

固定污染源排放可凝结颗粒物采样方法综述

朱法华¹, 李小龙², 段玖祥², 李军状², 张文杰²

(1. 国电环境保护研究院有限公司, 江苏 南京 210031; 2. 国电南京电力试验研究有限公司, 江苏 南京 210046)

摘要:综述了国内外固定污染源可凝结颗粒物(CPM)冲击冷凝法和稀释冷凝法 2 种采样方法,指出 CPM 是固定污染源排放颗粒物的重要组成部分,国内对于固定污染源 CPM 排放的监测和研究尚处于起步阶段,缺乏必要的 CPM 采样标准方法。通过分析 2 种采样方法的优缺点,提出冲击冷凝法需进一步降低 SO₂ 等水溶性气体的影响,提高气相 CPM 冷凝效果及超细颗粒态 CPM 的捕集效率;稀释冷凝法需提高采样装置的便携性实现可过滤颗粒物(FPM)和 CPM 的分离采样,提高采样管路壁面颗粒物回收率。同时,针对我国固定污染源如燃煤电厂大量使用湿法脱硫设备的情况,CPM 采样方法需提高对低温高湿且夹带液滴烟气采样的适用性。

关键词:固定污染源;可凝结颗粒物;采样方法;冲击冷凝;稀释冷凝

中图分类号:X701.2

文献标志码:A

文章编号:1674-6732(2019)03-0001-05

A Review of Sampling Methods of Condensable Particle Matter Emission from Stationary Source

ZHU Fa-hua¹, LI Xiao-long², DUAN Jiu-xiang², LI Jun-zhuang², ZHANG Wen-jie²

(1. State Power Environmental Protection Research Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210031, China; 2. Guodian Nanjing Electric and Test Research Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210046, China)

Abstract:Two sampling methods of condensable particle matter (CPM), impinger condensation and dilution condensation, are reviewed. It is pointed out that CPM is an important component of particulate matter emitted from stationary sources. At present, the monitoring and study of CPM emission from stationary source are still at start-up stage and there's no standard sampling method in China. The advantages and disadvantages of the two sampling methods are analyzed. The impinger condensation sampling method is proposed to further reduce the influence of SO₂ and other water-soluble gases, improve the condensation effect of gas-phase CPM and the capture efficiency of ultra-fine particle CPM. The dilution condensation sampling method needs to improve the portability of the sampling device, realize the separation of filterable particulate matter(FPM) and CPM sampling, and improve the recovery rate of particles on the wall surface of the sampling tube. At the same time, in view of the widespread use of wet desulfurization equipment in stationary pollution sources such as coal-fired power plants in China, the CPM sampling method needs to improve its applicability for low-temperature, high-humidity flue gas sampling with liquid droplets.

Key words: Stationary source; Condensable particle matter; Sampling method; Impinger condensation; Dilution condensation

颗粒物是影响环境空气质量的主要污染物之一^[1-2],尤其是细颗粒物对生态环境和人体健康有着重要影响^[3-4]。细颗粒物增多容易引起区域性雾霾^[5],并能富集大量有害物质,通过呼吸系统进入人体,容易引起多种疾病^[6-7]。源解析表明,固定污染源是大气环境中细颗粒物的主要排放源之一^[8-10]。

固定污染源排放颗粒物由 2 部分组成,一部分为可过滤颗粒物(FPM),另一部分为可凝结颗粒

物(CPM)^[11-12]。FPM 为在烟道环境下可用滤筒或滤膜捕集的颗粒物;CPM 为在烟道环境下为气态,但离开烟道进入环境空气冷却和稀释后立即冷凝和/或反应形成固态或液态颗粒物的物质,且所

收稿日期:2019-04-04;修订日期:2019-04-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41771498);国家重点研发计划基金资助项目(2017YFB0603203)

作者简介:朱法华(1966—),男,研究员级高级工程师,博士,长期从事电力环境保护科研工作。

有的 CPM 被认为属于 $PM_{2.5}$ ^[13]。目前,固定污染源颗粒物的排放主要关注了 FPM,而忽略了 CPM,导致了总颗粒物排放水平的低估^[14-16]。随着大众环境保护意识的提高,固定污染源污染物排放控制管理不断加强,排放清单逐渐完善,准确监测 CPM 的排放将是必然趋势。

对国内外固定污染源 CPM 采样方法进行综述,可为今后国内固定污染源 CPM 监测技术的发展,以及相关政策和标准的制定提供参考。

1 固定污染源 CPM 冲击冷凝采样法

1.1 干式冲击冷凝采样法

冲击冷凝采样法是美国国家环境保护局(EPA)在 Method 202 中提出的 CPM 标准测试方法,经过多年的优化和改进^[17-19],形成的比较完善的采样方法,称为干式冲击冷凝采样法,采样系统见图 1。

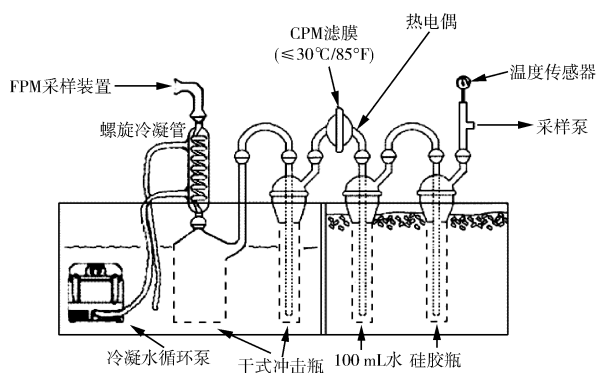


图 1 干式冲击冷凝采样系统

方法原理为,固定污染源烟气经过 FPM 采样装置后,进入螺旋冷凝管和两级干式冲击冷凝瓶,保持水浴温度 $\leq 30^{\circ}\text{C}$,气相 CPM 在螺旋冷凝管和冲击冷凝瓶中凝结成颗粒态 CPM 并被部分捕集,剩下未被捕集的颗粒态 CPM 被后置 CPM 滤膜所收集。采样结束后,立即用流量 $\geq 14 \text{ L/min}$ 的高纯氮气,对第一级冲击冷凝瓶至 CPM 滤膜的采样管路,吹扫至少 1 h,以降低 SO_2 等水溶性气体对测试结果的影响。采样完成后,用去离子水冲洗 FPM 过滤装置后端与 CPM 滤膜之间的管路,并将冲洗液与两级冲击冷凝瓶中的溶液混合,然后用丙酮和正己烷冲洗上述管路得到有机洗液。使用正己烷萃取分离的方式,分别得到溶液和 CPM 滤膜上的有机和无机组分,CPM 总质量即为 2 部分之和。

该方法现行版本与早期版本的湿式冲击冷凝采样法^[12]相比主要做出了 3 大改进:(1)加装螺旋冷凝管,增加烟气停留时间和换热面积,提高气相 CPM 的冷凝效果,降低气相 CPM 的逃逸;(2)将湿式冲击瓶改为干式冲击瓶,冲击瓶中不加去离子水,最大限度避免 SO_2 等可溶性气体对测试结果的影响,第一级冲击瓶为大肚瓶,容量较大,瓶中无延长进气玻璃管,增加了烟气停留时间和气相 CPM 凝结效果;(3)增加后置滤膜,提高颗粒态 CPM 的捕集效率,降低超细颗粒态 CPM 的逃逸率。

经过改进,能显著减少 SO_2 溶解、气相和超细颗粒态 CPM 逃逸等引起的 CPM 测试结果偏差^[17],特别是 SO_2 溶解影响的正偏差能降低 40%~80%,对于高 SO_2 浓度的烟气测试,正偏差甚至能够降低 85%~95%^[19]。

1.2 其他冲击冷凝采样法

近年来国内外一些学者基于 Method 202 中的方法,提出了类似的 CPM 冲击冷凝采样法。裴冰^[11]对 Method 202 的方法进行了改进,将第二级冲击冷凝瓶换成两级干式球形缓冲瓶,其他基本不变,增大了烟气换热面积和停留时间,提高了颗粒态 CPM 凝结生成率和捕集效果。Tsukada 等^[20]的采样装置,相比现行 Method 202 方法,只有一级螺旋冷凝管和冷凝液接收瓶,无第二级冲击瓶和后置 CPM 滤膜,不能保证颗粒态 CPM 的充分冷凝和捕集。胡月琪等^[21]的采样方法,采样装置与 Method 202 比较,无第二级冲击冷凝瓶,在 CPM 滤膜后增加了超纯水吸收液,超纯水吸收液能充分捕集颗粒态 CPM,但增加了 SO_2 可溶性气体的溶解,且采样结束后未使用氮气吹脱,使得 SO_2 溶解引起的测试结果误差较大。杨柳等^[22]在国产 FPM 采样装置后连接两级螺旋冷凝管和三角抽滤瓶组合来捕集 CPM,使用两级螺旋冷凝管,确保了气相 CPM 的充分凝结,但无后置滤膜,无法保证颗粒态 CPM 的充分捕集。李军状等^[23]的采样方法,在杨柳的基础上进行了完善,增加了后置 CPM 滤膜,确保了颗粒态 CPM 的充分捕集,并通过现场实测表明该方法测试结果有较好的精密度。上述自制或改进方法均脱胎于 Method 202 不同时期的版本,但研究者未进行对比试验说明这些方法相比 Method 202 的改进效果及测试误差变化情况。

1.3 冲击冷凝采样法的改进方向

冲击冷凝采样法的优点是能实现固定污染源

FPM 和 CPM 的分离捕集,且与其他方法比较,采样装置具有一定的便携性,但该方法仍然有一定局限性。冲击冷凝采样法采样过程中颗粒态 CPM 的形成与实际进入大气后有差别;干式冲击冷凝瓶和氮气吹脱并不能完全消除 SO_2 等水溶性气体的溶解;气相 CPM 冷凝形成颗粒态 CPM 的效果有待提高;滤膜对超细颗粒态 CPM 捕集效率也有提升空间;此外,需进一步完善该方法对低温高含湿量夹带液滴烟气采样的适用性。

冲击冷凝采样法采样过程中 CPM 的形态变化由采样方法所决定,没有改进空间,但根据 CPM 的定义,影响颗粒态 CPM 形成的主要因素为温度,而该方法的采样原理也主要依据这一点。对于进一步降低或消除 SO_2 等水溶性气体溶解的影响,除使用干式冲击冷凝瓶和氮气吹脱外,可考虑在采样之前使用某种吸附剂降低 SO_2 浓度以减小其影响。提高气相 CPM 的冷凝效果则需要进一步改进冷凝管和冲击冷凝瓶等,以增大烟气换热面积和停留时间。提高超细颗粒态 CPM 的捕集效率,则需要使用截留效率足够好的滤膜,李军状等^[23]对比了几种不同材质的滤膜,认为特氟龙材质的滤膜截留效率最高。

Method 202 一般用于含湿量不饱和烟气的采样,若用于高湿量夹带液滴的烟气采样,Method 202 的操作手册^[24]建议,CPM 采样之前连接的 FPM 采样需使用加热的烟道外采样法,例如 Method 5^[25],确保进入 CPM 采样装置的烟气中液态水全部蒸发。但我国燃煤电厂大量使用湿法脱硫设备,其排放的烟气温度低、含湿量高且夹带液滴,若使用该方法,其适用性有待进一步验证。

经过一定的现场调研发现,国内有单位使用烟气加热的方式进行了湿法脱硫后夹带液滴烟气的 CPM 采样,也有单位未加热烟气直接采样,但这些单位未公布相关测试结果,无法对 2 种采样方式进行对比评价。若采样前加热夹带液滴烟气,虽然保证了 CPM 的采样过程与 Method 202 的一致性,但忽视了烟气加热过程中 FPM 中易挥发性物质的蒸发析出穿透 FPM 滤膜,被 CPM 采样装置捕集,导致 CPM 测试结果产生正偏差;而烟气不加热直接采样,因 CPM 采样之前先过滤 FPM,当烟气含有液滴的时候,将会导致 FPM 中部分可溶性物质溶解后随液滴穿透 FPM 滤膜,也会导致 CPM 测试结果产生正偏差,但 2 种方法对总颗粒物的测试结果不

会造成影响。由此可以确定,加热或不加热烟气采样均会导致 CPM 测试结果的正偏差,但 2 种方法引起偏差大小还需进一步试验研究。

综上所述,冲击冷凝采样法若要完全适用于高含湿量夹带液滴烟气的采样,还需寻找新的改进方式以解决液滴问题,例如,利用 Nafion 管的除湿干燥特性^[26-27],在采样之前去除烟气中大部分水分,而不影响烟气中其他组分特性,将是一个可供研究的方向。

2 固定污染源 CPM 稀释冷凝采样法

2.1 国外稀释冷凝采样法

由于冲击冷凝采样法容易引起测试结果偏差,且采样过程中颗粒态 CPM 的形成与实际进入大气的情况有出入。2004 年,EPA 提出了固定污染源颗粒物测试的稀释冷凝采样法 CTM-039^[28],国际标准化组织(ISO)也于 2013 年发布了类似的稀释采样法 ISO 25597^[29]。

稀释冷凝采样法的原理是将高温烟气在稀释通道内用洁净空气进行稀释,并冷却至环境温度,稀释冷却后的混合气体进入采样舱或停留室,停留一段时间后颗粒物被采样器捕集。以 CTM-039 方法为例,采样系统见图 2。烟气采用预测流速的等速采样法从烟道内抽取,并进入采样枪前端烟道内采样的 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 旋风切割器,首先分离粒径 $>10 \mu\text{m}$ 和 $2.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 的 FPM。粒径 $<2.5 \mu\text{m}$ 的 FPM、CPM 和烟气进入加热采样枪和文丘里管,然后在混合锥中与干燥洁净的稀释空气混合冷却,并在停留室中停留一段时间。气相 CPM 在停留室中充分冷凝成颗粒态,随后烟气中的可过滤 $\text{PM}_{2.5}$ ($\text{FPM}_{2.5}$) 和颗粒态 CPM 被后置的 142 mm 滤膜所捕集。采样过程中需要调节稀释空气温度,以确保采样滤膜出口温度 $<29.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。采样结束后,旋风切割器、采样枪、文丘里管以及连接管使用丙酮冲洗。混合锥、停留室和滤膜架入口先用去离子水冲洗再用丙酮冲洗。所有的冲洗液需要蒸发干燥并恒重。总 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量由滤膜及去离子水和丙酮冲洗液恒重质量决定。

该方法同时采集了烟气中的 $\text{FPM}_{2.5}$ 和 CPM,其测定结果为总 $\text{PM}_{2.5}$,能够反映烟气中真实 $\text{PM}_{2.5}$ 排放情况,但无法单独测定 CPM。稀释冷凝法的关键在于烟气和稀释空气的混合冷却效果,确保 CPM 的充分冷凝。因此,稀释采样装置的体积一

般都比较大,设备较笨重。此外,采样装置较大,回收颗粒物时需要清洗的壁面较多,颗粒物不易完全冲洗回收,且采样装置不够便携,限制较多,现场应用较为不便^[12]。

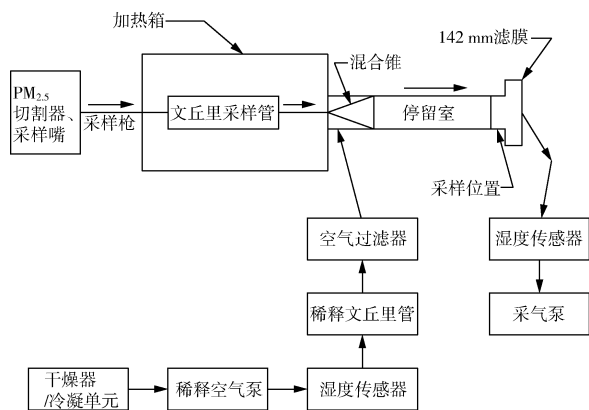


图 2 EPA CTM-039 采样系统

2.2 国内稀释冷凝采样法

近些年,国内一些机构,如北京大学、清华大学、南开大学和北京航空航天大学等也相继研发了类似的稀释冷凝法采样系统,用于科学研究。目前,这些机构的稀释采样系统已从最初的庞大笨重变为可便携,且在稀释比、停留时间及混合效果等方面做了不少改进^[30-33]。但这些采样系统也只能采集烟气中的总颗粒物,而无法将 FPM 和 CPM 分

开采样。

2.3 稀释冷凝采样法的新进展

塞维利亚大学工程学院化学与环境工程系(简称“DIQA”)基于 CTM-039 的稀释冷凝法,对方法进行了改进,研制了具有创新意义的采样系统,能够将 FPM 和 CPM 分开采集。该采样系统取消前置的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 旋风切割器,先在稀释混合段之前用滤膜将烟气中的 FPM 全部过滤捕集,则 FPM 滤膜之后管路内壁上清洗回收和后置 CPM 滤膜捕集的颗粒物仅为 CPM,实现了 FPM 和 CPM 的分开采集,采样系统见图 3,与国内外稀释采样系统主要设计参数对比见表 1。

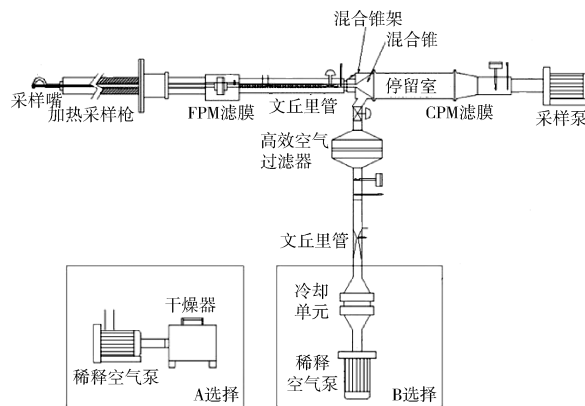


图 3 DIQA 改进 CPM 稀释冷凝法采样系统

表 1 国内外稀释采样系统设计参数

机构名称	稀释比	停留时间/s	稀释混合段直径/cm	稀释混合段长度/cm	停留室直径/cm	停留室长度/cm	FPM 和 CPM 是否分开采集
EPA ^[28]	20~40	1	3.2	14			否
ISO ^[29]	≥20	≥10					否
北京大学 ^[30]	20~100	90	12.7	130	50	110	否
清华大学 ^[31]	10~80	60~70	4.5	84	45	70	否
南开大学 ^[1,32]	15~100	45~60	40	80			否
北京航空航天大学 ^[33]	20~50	10	20	30	20	70	否
DIQA ^[34]	10~40		10.16		10.16	43.18	是

2.4 稀释冷凝采样法的改进方向

尽管稀释冷凝采样法能够真实反映气相 CPM 进入大气后的形成过程,采样装置的便携性近几年也做了较大改进,但对于国内固定污染源采样而言,由于测点平台设计未充分考虑监测工作的便利性,仪器设备大多需要人力搬运到监测现场,而目前的稀释采样装置依然较为笨重,不便于搬运,采

样装置还需向更为轻巧和便携化方向发展。此外,目前大多数稀释冷凝采样装置还无法实现 FPM 和 CPM 的分离采样,而 DIQA 的改进装置目前还停留于实验室阶段,这将限制对固定污染源颗粒物排放特性的深入研究,有必要加快稀释冷凝法中 FPM 和 CPM 分离采样装置的研究和推广。

稀释冷凝采样法使用加热采样枪抽取烟气,若

仅计算总颗粒物的含量,加热与否对测试结果基本没有影响,若要分别计算 FPM 和 CPM 的浓度,采样枪加热是否会导致 FPM 中易挥发性物质的蒸发析出穿透 FPM 滤膜,致使 FPM 和 CPM 测试结果产生偏差,也有待进一步研究,特别是针对湿法脱硫后高含湿量夹带液滴烟气的采样。另外,采样装置稀释仓和停留室内表面较大,如何充分清洗回收壁面附着的颗粒物,对测试结果的准确性有重要影响。

3 结语

CPM 是固定污染源排放颗粒物的重要组成部分,长期以来,固定污染源颗粒物排放关注的重点为 FPM,忽视了 CPM 的研究,导致颗粒物排放水平的低估。准确监测 CPM,是进一步完善固定污染源颗粒物排放控制管理的基础。但目前,国内尚无固定污染源 CPM 采样标准方法。当前,国内外 CPM 的采样方法主要有两种,冲击冷凝采样法和稀释冷凝采样法。两种采样方法各有优缺点,实际应用中都需进一步完善和改进,直接用于我国固定污染源 CPM 的监测也需进一步验证和优化。特别是当前我国燃煤电厂大量使用湿法脱硫和湿式电除尘器,导致排放烟气温度低、含湿量高且夹带液滴的情况下,需研究更为适用和完善的采样方法用于 CPM 的排放测试。

[参考文献]

- [1] 孔少飞. 大气污染源排放颗粒物组成、有害组分风险评价及清单构建研究[D]. 天津:南开大学,2012.
- [2] 姬亚芹. 城市空气颗粒物源解析土壤风沙尘成分谱研究[D]. 天津:南开大学,2006.
- [3] LI J W, QI Z F, LI M, et al. Physical and chemical characteristics of condensable particulate matter from an ultralow-emission coal-fired power plant [J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31 (2): 1778 - 1785.
- [4] QI Z F, LI J W, WU D L, et al. Particulate matter emission characteristics and removal efficiencies of a low-low temperature electrostatic precipitator [J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31 (2): 1741 - 1746.
- [5] 贺克斌,杨复沫,段凤魁,等. 大气颗粒物与区域复合污染[M]. 北京:科学出版社,2011: 139 - 306.
- [6] RUSSELL A G, BRUNEKREFF B. A focus on particulate matter and health [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43 (13): 4620 - 4625.
- [7] SCHWARZE P E, OVREVIK J, LÅG M, et al. Particulate matter properties and health effects: consistency of epidemiological and toxicological studies [J]. *Human & Experimental Toxicology*, 2006, 25 (10): 559 - 579.
- [8] 王佳. 郑州市 PM_{2.5} 污染特征及其源解析研究[D]. 郑州:郑州大学,2015.
- [9] 贾琳琳. 北方寒冷地区大气颗粒物污染特征及源解析研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [10] 王苏蓉,喻义勇,王勤耕,等. 基于 PMF 模式的南京市大气细颗粒物源解析 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35 (12): 3535 - 3542.
- [11] 裴冰. 燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放 [J]. *环境科学*, 2015, 36 (5): 1544 - 1549.
- [12] FENG Y P, LI Y Z, CUI L. Critical review of condensable particulate matter [J]. *Fuel*, 2018 (224): 801 - 813.
- [13] United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). Dry impinger method for determining condensable particulate emissions from stationary sources; Method 202 [S]. Washington, D. C. : U. S. EPA, 2010.
- [14] WANG G, DENG J G, MA Z Z, et al. Characteristics of filterable and condensable particulate matter emitted from two waste incineration power plants in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018 (639): 695 - 704.
- [15] YANG H H, LEE K T, HSIEH Y S, et al. Emission characteristics and chemical compositions of both filterable and condensable fine particulate from steel plants [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, 15: 1672 - 1680.
- [16] 胡月琪,冯亚君,王琛,等. 燃煤锅炉烟气中 CPM 与水溶性离子监测方法及应用研究 [J]. *环境监测管理与技术*, 2016, 28 (1): 41 - 45.
- [17] RICHARDS J, HOLDER T, GOSHAW D. Optimized method 202 sampling train to minimize the biases associated with method 202 measurement of condensable particulate matter emissions: hazardous waste combustion specialty conference [C]. United States: Air & Waste Management Association, 2005.
- [18] BOWER R M, MERRILL R G. Condensable particulate and method 202 modifications update [C]. United States: Air and Waste Management Association, 2007: 251 - 256.
- [19] WILLENBERG J, RICHARDS J. Condensable particulate matter-measuring and permitting it: pacific northwest international section annual conference [C]. Anchorage, AK: Air & Waste Management Association, 2008.
- [20] TSUKADA M, HORIKAWA A, SUGIMOTO K, et al. Emission behavior of condensable suspended particulate matter from a laboratory scale RDF fluidized bed combustor [J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2007, 40 (10): 869 - 873.
- [21] 胡月琪,马召辉,冯亚君,等. 北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征 [J]. *环境科学*, 2015, 36 (6): 1966 - 1973.
- [22] 杨柳,张斌,王康慧,等. 超低排放路线下燃煤烟气可凝结颗粒物在 WFGD、WESP 中的转化特性 [J]. *环境科学*, 2019, 40 (1): 121 - 125.

(下转第 11 页)

- Environmental Science & Technology, 2008, 42 (7): 2674 - 2680.
- [6] ORTÑO N, CONESA J A, MOLTÓ J, et al. Pollutant emissions during pyrolysis and combustion of waste printed circuit boards, before and after metal removal [J]. Science of The Total Environment, 2014 (499): 27 - 35.
- [7] 冷湘梓, 姚敏, 余辉, 等. 废弃电器电子产品中废线路板的 POPs 排放控制研究 [J]. 污染防治技术, 2018, 31 (1): 55 - 58.
- [8] WANG R, XU Z. Recycling of non-metallic fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE): A review [J]. Waste Management, 2014, 34 (8): 1455 - 1469.
- [9] 顾明事, 李兴福, 赵泽华, 等. 江苏省废线路板处置利用现状及管理对策研究 [J]. 污染防治技术, 2017, 30 (5): 90 - 94.
- [10] 许鹏. 废弃印刷线路板热解及热解气焚烧机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [11] SOLER A, CONESA J A, ÑIGUEZ M E, et al. Pollutant formation
.....
- (上接第 5 页)
- [23] 李军状, 朱法华, 李小龙, 等. 燃煤电厂烟气中可凝结颗粒物测试研究进展与方法构建 [J]. 电力科技与环保, 2018, 34 (1): 37 - 44.
- [24] United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). EPA method 202 best practices handbook [Z]. Washington, D. C.: U. S. EPA, 2016.
- [25] United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). Determination of particulate matter emissions from stationary sources: Method 5 [S]. Washington, D. C.: U. S. EPA, 2017.
- [26] 赵金宝, 赵珊, 李峰. Nafion 干燥器除湿技术在 VOC 监测上的应用 [J]. 分析仪器, 2018 (2): 6 - 13.
- [27] 林源. 便携式烟气预处理器技术在比对监测中的应用 [J]. 环境监控与预警, 2016, 8 (6): 37 - 39.
- [28] United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). Measurement of PM_{2.5} and PM₁₀ by dilution sampling (constant sampling rate procedures): CTM 039 [S]. Washington, D. C.: U. S. EPA, 2004.
- in the pyrolysis and combustion of materials combining biomass and e-waste [J]. Science of The Total Environment, 2018 (622 - 623): 1258 - 1264.
- [12] DUAN H, LI J, LIU Y, et al. Characterizing the emission of chlorinated/brominated dibenzo-p-dioxins and furans from low-temperature thermal processing of waste printed circuit board [J]. Environmental Pollution, 2012 (161): 185 - 191.
- [13] 黄蓉, 毕承路, 赵文杰, 等. 废线路板粉末中二噁英含量的测定 [J]. 中国环境监测, 2016, 32 (6): 130 - 134.
- [14] MREMA E J, RUBINO F M, BRAMBILLA G, et al. Persistent organochlorinated pesticides and mechanisms of their toxicity [J]. Toxicology, 2013, 307: 74 - 88.
- [15] 京都议定书. 斯德哥尔摩公约 [J]. 信息导刊, 2005 (21): 23.
- [16] 张杜杜, 徐东军. 废旧线路板非金属材料综合利用 [J]. 再生资源与循环经济, 2009, 2 (10): 38 - 41.
- [29] ISO. Stationary source emissions-test method for determining PM_{2.5} and PM₁₀ mass in stack gases using cyclone samplers: ISO 25597—2013 [S]. Switzerland: ISO, 2013.
- [30] 周楠, 曾立民, 于雪娜, 等. 固定污染源稀释通道的设计和场外测试研究 [J]. 环境科学学报, 2006, 26 (5): 764 - 772.
- [31] 李兴华, 段雷, 郝吉明, 等. 固定燃烧源颗粒物稀释采样系统的研制与应用 [J]. 环境科学学报, 2008, 28 (3): 458 - 463.
- [32] 韩斌. 燃煤尘稀释采样器的设计及成分谱建立方法研究 [D]. 天津: 南开大学, 2009.
- [33] 李兴华, 曹阳, 蒋靖坤, 等. 固定污染源 PM_{2.5} 稀释采样器的研制 [J]. 环境科学学报, 2015, 35 (10): 3309 - 3315.
- [34] CANO M, VEGA F, NAVARRETE B, et al. Characterization of emissions of condensable particulate matter in clinker kilns using a dilution sampling system [J]. Energy & Fuels, 2017, 31 (8): 7831 - 7838.

栏目编辑 王湜